

電力磁気応用40年

著者	一ノ倉 理
雑誌名	東北大学電通談話会記録
巻	86
号	2
ページ	21-32
発行年	2018-08
URL	http://hdl.handle.net/10097/00123406

最終講義

電力磁気応用40年

40 years with Power Magnetics

一ノ倉 理*

Osamu ICHINOKURA



本日は「電力磁気応用40年」というタイトルで最終講義をさせていただきます。私の研究内容はパワーエレクトロニクスとパワーマグネティクス、応用システムの3つに分かれます(図1)。パワーエレクトロニクスとしては、インバータ、コンバータなど半導体デバイスを使った電力変換制御装置、パワーマグネティクスでは、トランス、モータ、発電機など基本的なデバイスのほかに、可変インダクタや磁気ギアなど特殊な磁気デバイスを手がけました。応用システムとしては、モータドライブ、電気自動車、系統電圧調整装置、さらに太陽光発電や風力発電にも力を入れてきました。

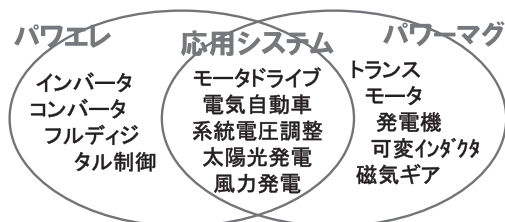


図1 研究内容の大まかな説明図

これらの中から本日は次の4点について話をします。1番目は直交磁心の動作解析です。これは私の学生時代の研究です。2番目が可変インダクタとその応用で、これは助手のときから始めて現在も継続している研究です。3番目がSRモータと電気自動車、4番目が磁気回路法によるモータ解析で、いずれも教授になってから始めた研究です。これらの研究の全てに非線形磁気特性が関わっていますが、そういう意味では学生時代にやりました直交磁心が私の研究の原点になっています。

1. 直交磁心の動作解析

図2はパラメトリック変圧器と呼ばれた電力変換器です。左側が直交磁心です。これが1次と2次巻線で、よく見ますと1次と2次が空間的に90度ねじれていることがわかります。右側の箱みたいなものがコンデンサです。この装置はパラメータ振動という非線形振動を利用しています。1950年代に東京大学でパラメトロ計算機が発明されました。これはフェライトのトロイダルコアを2個使ってパラメータ振動を発生させ、その振動の位相が0度と180度の2つの安定点を持っていることから0と1の2値論理素子に適用して計算機を構築したものです。当時は非線形振動の研究が盛んにおこなわれていて、パラメトリック変圧器は非線形振動を電力変換に応用したユニークな例です。



図2 パラメトリック変圧器

パラメトリック変圧器は、入力電圧や負荷が変動しても出力電圧は一定という定電圧機能、負荷電流がある値を超えると自律的に発振を停止する過負荷保護機能、伝導性の電氣的ノイズのフィルタリング機能を持っていて、磁気デバイスとコンデンサだけで信頼性の高い交流安定化電源が実現

* 東北大学未来科学技術共同研究センター教授

できるということで注目された装置です。しかし、直交磁心そのものの動作機構が良く分かっていなかったため、定量的な解析手法の確立が望まれていました。

直交磁心は磁気飽和を利用した可変インダクタの一種です。図3は可変インダクタとして使う場合の基本回路と鉄心の磁気特性を示しています。鉄心に使用する強磁性体は磁気飽和特性を持っていますが、巻線のインダクタンスは磁化曲線の傾きに比例します。磁束密度が低い領域ではインダクタンスが大きく、磁束密度が高くなって飽和領域に入るとインダクタンスは下がります。したがって直交磁心の1次巻線に直流電流を流すと磁束密度が上がり、鉄心が飽和するため2次巻線のインダクタンスが下がります。インダクタンスが減少すると電流が増加するので、非常にシンプルな方法で交流電流を制御できることになります。

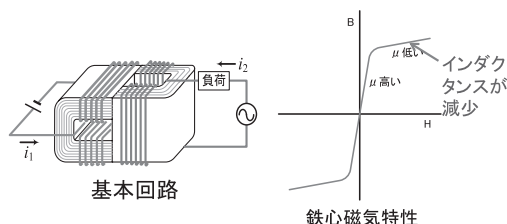
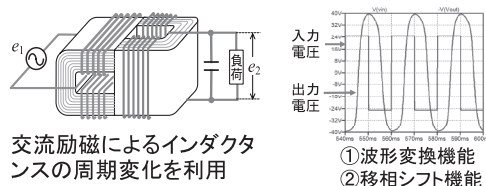


図3 直交磁心を用いた可変インダクタ

パラメトリック変圧器では、1次側から交流励磁を加えますので2次巻線のインダクタンスは周期的に変化します。周期的に変化するインダクタンスに適当な値のコンデンサを接続すればパラメータ振動が生じます。パラメトリック変圧器は定電圧特性や過負荷保護機能のほかいくつかのユニークな特徴を持っています。図4に示すように、入力電圧が方形波であっても出力電圧はほぼ正弦波になります。また、入力電圧と出力電圧の間に約90度の位相差があります。これらの機能を利用した正弦波インバータや可変周波数発振器、あるいは共振型DC/DCコンバータが提案され一部実用化されました。また、90度位相が異なるという性質を利用してパラメトリックモータというユニークなモータが考案されています。

正弦波インバータでは、方形波インバータとパラメトリック変圧器を組み合わせで直流から正弦波交流を作っています。現在はパルス幅変調(PWM変調)という方法でインバータを制御すれば直流から正弦波交流を作ることができます

が、PWM変調には高速なパワーデバイスが必要になります。パラメトリック変圧器が研究されていた1970年代は高速で大容量のパワーデバイスがまだ登場していなかった時代ですので、非線形振動を利用して正弦波を作るというアイデアは非常に巧みだったと言えます。



- 派生的
応用
- ・正弦波インバータ(1974村上)
 - ・可変周波数発振器(1976岡)
 - ・共振型DC-DCコンバータ(1982安村)
 - ・パラメトリックモータ(1980村上, 菊地)

図4 パラメトリック変圧器の機能と応用

以上のように、パラメトリック変圧器からさまざまな応用が派生しましたが、当時は定量的な解析手法も設計法もありませんでした。これを明らかにすることが私の学生時代の研究テーマです。

直交磁心の磁気回路は途中でねじれていますので、通常のトランスのように磁束が鉄心内を均一に流れるわけではなく分布が生じます。さらに鉄心には飽和特性の鋭い方向性ケイ素鋼板を使っていました。したがって三次元的磁束分布を持つ非線形性の強い磁気デバイスをどう扱うかという問題になります。

1970年代はパーソナルコンピュータや有限要素法による磁場解析といったツールが無い時代ですので、実験で答えを出すしかありません。非常に幸運だったのは、私の所属していた研究室に当時としては最新鋭の4チャンネルオシロスコープがあったことです。それを使って波形観測から始めました。

直交磁心の場合、観測する波形は、1次側の電圧、電流、磁束、2次側の電圧、電流、磁束の6種類です(図5)。オシロスコープは4チャンネルですから1次と2次に分けて半分ずつ観測しますが、当時のオシロは今のデジタルオシロみたいに測定波形の値を画面に表示してくれるわけではありません。昔はフードとカメラがセットになった接写装置というのがあって、それをオシロスコープの画面にかぶせて写真を撮り、自分で現像して少し大き目の印画紙に焼き付けます。出来上

がった写真を紙に張り付けて、その写真からデータを読み取るという作業になります。

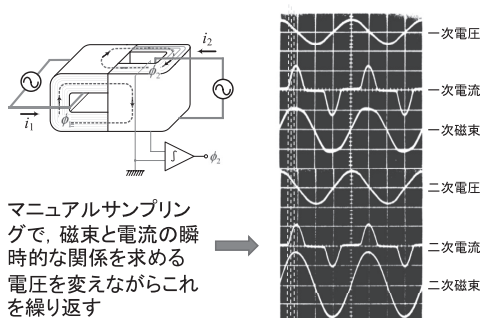


図5 直交磁心の基本的な動作波形

1次と2次の電圧値を変えながら波形を観測してデータを取得するという作業を繰り返して得られたグラフが図6です。これは2次側の磁束と電流（グラフでは起磁力で表示）の関係を、1次磁束をパラメータとして整理したものです。これを見ると、1次磁束を上げると鉄心が飽和し、2次側から見た磁化曲線が変化することがわかります。異なる電圧で観測した磁束と電流をこのように整理するとそれぞれが1本の曲線にきれいに乗るといことは、このグラフが直交磁心の磁束と電流の瞬時的な関係を表していると解釈できます。

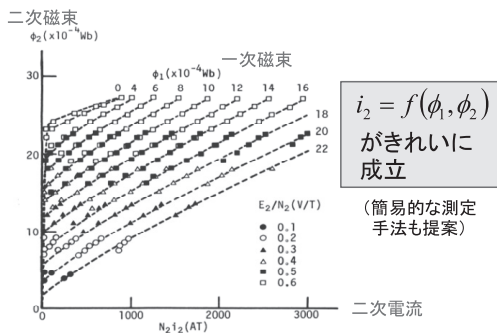


図6 直交磁心の磁束と電流の関係

したがって、これを直交磁心の基本特性とすれば応用回路が解析できます。図7はパラメトリック変圧器の解析を説明したものです。左上がパラメトリック変圧器の回路図で×印が直交磁心を表しています。指定された1次電圧、コンデンサ及び負荷抵抗に対して、パラメトリック発振時の2次電圧を求めるのが目的です。右の図は、1次磁

束と2次磁束が与えられたときの2次電流とコンデンサ電圧（これが2次電圧）を直交磁心の基本特性から求める方法を示しています。図の第1象限が直交磁心の磁化曲線です。1次電圧は与えられますが、パラメトリック発振時の2次電圧は未知なので、最初は適当な電圧を仮定します。1次と2次の電圧が与えられますと1次磁束と2次磁束がわかりますので、1象限の磁化曲線から直交磁心の2次電流が図式的に求められます。負荷電流は仮定した電圧からわかりますので、2次電流と負荷電流を合成すればコンデンサ電流が求められます。コンデンサ電流を積分すればコンデンサ電圧になりますので、それが最初に仮定した電圧と一致すれば解になります。もちろん最初から一致するわけではありませんので、2次電圧を変えながら一致する解を内挿法で探索していくことになります。当時は簡単な電卓しか手元にありませんでしたので非線形問題を図式的に解析する方法が流行っていました。左下の波形が計算結果と実測値の比較です。計算値と実測値が良好に一致していることがわかります。

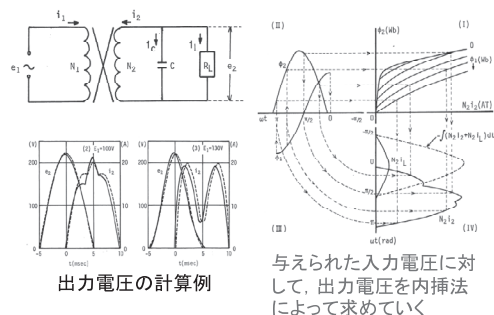


図7 パラメトリック変圧器の図式解析

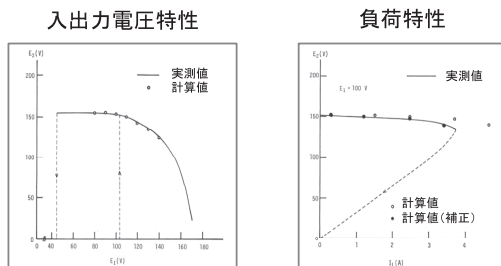


図8 パラメトリック変圧器の特性

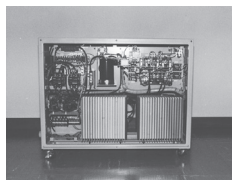
2次電圧波形から実効値を計算すると、パラメトリック変圧器の入出力電圧特性と負荷特性が求められます（図8）。いずれもシンボルが計算値、実線が実測値で両者が良好に一致していることがわかります。また、入力電圧のある範囲で出力電

圧はほぼ一定になるので安定化電源として使えることも了解されます。

これらをまとめて学位をいただいたわけですが、そのあとは応用にも力を入れようということで、図9のような直流交流連系用変換器、今でいうと太陽光発電システムのパワーコンディショナに相当する変換器を研究しました。これは東北電力と共同で1982年頃から始めたものですが、ちょうどその数年前に中東で紛争が起きて石油が入ってこないといういわゆるオイルショックがあり、代替エネルギーとしての太陽光発電システムに注目が集まっていた時期です。それまでは、太陽光発電のような独立電源を電力系統に連系することはできませんでしたが、電気事業法が改正されて家庭用100V、200Vの系統に太陽光発電システムを連系できるようになった時期でもあります。

家庭用ですので安全性と信頼性が厳しく要求されますが、直交磁心の特徴は信頼性や安全性に非常にマッチするということで始めた研究です。結果的に出力4.5kWで効率90%という、当時としては優れた性能と言える変換器を開発して、東北電力研究開発センターに設置されていた全電化住宅に適用して実用性を実証しました。

その後、オイルショックが落ち着き原油の供給も安定したために、価格の高い太陽光発電は後退してしまい、私どもの研究も実証試験で終わったわけですが、直交磁心の過電圧保護とか過負荷保護機能のように、デバイスそのもののがもつ機能を活用することは電力変換器を開発する上で非常に大切な考え方であることを学びました。



直交磁心を用いたDC-AC連系用変換器(4.5kW, 効率90%)



研究開発センター内に設置された全電化住宅

図9 開発した太陽光発電システム用DC-AC連系用変換器

太陽光発電の後に直交磁心を何に応用するかいろいろ模索しましたが、そもそも可変インダクタンスで何ができるかということを考えますと、図10の4種類に分類されることがわかります。電源と負荷の間に可変インダクタを直列に挿入すれば負荷に供給される有効電力を制御できます。ま

た、インダクタンスを流れる電流は電圧に対して90度位相が遅れることを利用すれば、電源に並列に可変インダクタを接続して無効電力を制御することができます。さらに、可変インダクタとコンデンサを直列に接続すれば共振周波数を制御することができます。冒頭で触れた共振型DC/DCコンバータはこの原理を利用したもので、テレビのバックライト電源に実用されました。冒頭で説明したように、コンデンサに並列接続された可変インダクタを周期的に変化させればパラメータ振動が生じます。このように可変インダクタはいろいろな使い方ができますが、直交磁心そのものはインダクティブな素子ですので、有効電力を制御していても必ず無効電力が生じ、その分デバイスのサイズが大きくなります。これは電源装置としては不利になります。そこで、無効電力のみを制御することが可変インダクタとしては素直な使い方と考えて次の応用研究にシフトしました。

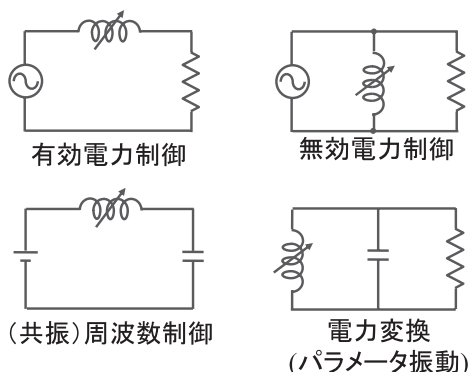


図10 可変インダクタでできること

2. 可変インダクタとその応用

電力系統では、系統の電圧調整に無効電力を利用します。図11は系統の模式図です。電流が変動すると配電線の抵抗やインダクタンスによって系統の電圧が変動します。線路長が長くなると抵抗成分よりインダクタンス成分のほうが支配的になりますので、電圧変動を抑制するにはインダクタンスの無効電力を補償することが効果的です。オーソドックスには電圧変動に応じてリアクトルやコンデンサを系統に投入しますが、段階的な制御で制御速度も遅いため急激な電圧変動には対応できません。これを解決するために、インダクタンスを流れる電流をサイリスタで位相制御する静

止型無効電力補償装置 (SVC) と呼ばれる装置が考案されています。これは遅れから進み無効電力まで連続的に制御できますが、電力系統に適用するには信頼性が高くかつ低価格であることが望まれます。そこで鉄心と巻線だけで構成され、高信頼で安価な可変インダクタを無効電力補償に利用しようということになりました。

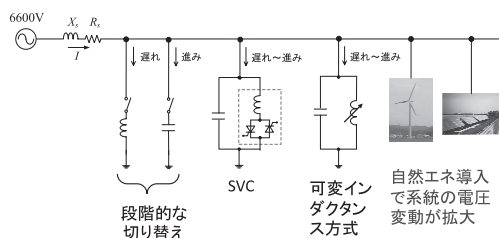
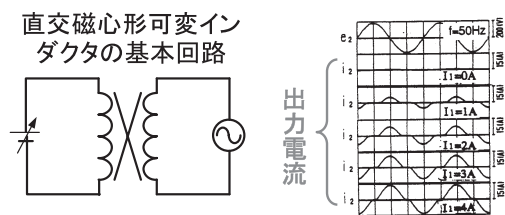


図11 無効電力補償による系統電圧調整

当初は直交磁心形可変インダクタでスタートしましたが、課題になったのが高調波です。図12は直交磁心形可変インダクタの制御時の電流波形ですが、非正弦波であることがわかります。電力装置を電力系統に接続する場合、出力電流の各次高調波成分を3%以下、総合ひずみ率で5%以下にするという規制がありますので、電流波形を改善する必要があります。



央脚の巻線が主巻線で交流電圧が印加されます。外側のヨーク巻線が制御巻線です。制御巻線に直流電流を流して鉄心を飽和させてインダクタンスを下げる場所は直交磁心と同じです。当初はこのような鉄心形状では磁化曲線の非線形性が強く出て高調波が問題になるのではと懸念しましたが、実験してみると意外に電流波形が良好です。磁場解析で分析した結果、鉄心が飽和したときに田形鉄心から漏れ磁束が生じ、それが中央脚付近でキャンセルされることによって、直交磁心のくさび型ギャップと同様の効果が得られていることがわかりました。これに基づいて最適設計を行い300kVA の可変インダクタを開発しました。

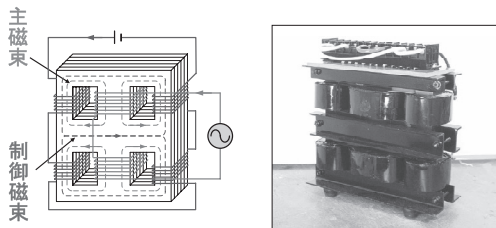
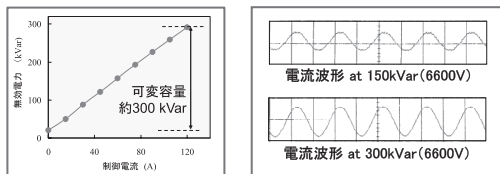


図15 田形磁心の構成と外観

図16が300kVA 実証機の無効電力制御特性と電流波形です。制御特性の直線性が良好なこと、電流波形がほぼ正弦波であることがわかります。電流ひずみ率は2～3%で、実際の電力系統に接続できるレベルです。先ほどサイリスタを使ったSVCの話をしたましたが、サイリスタの位相制御によって高調波が発生します。それを補償するために高調波フィルタを使いますが、田形方式はフィルタを必要としないことが特長の一つです。



制御の直線性良好

電流歪み率は2～3%
(高調波フィルタ無し)

図16 6600V-300kVA の田形磁心形可変インダクタの制御特性

図17は実証機の制御時の応答特性です。磁気デバイスは応答特性が悪いというイメージがありますが、制御電流を適切に制御すれば高速で応答し

ます。この場合の制御電流は直流ですので、半導体チョップとかサイリスタ整流器を直流側の制御にえば高速制御が可能になります。この例ですとオンオフいずれの場合も80ms 程度で制御されています。可変インダクタの制御に要する電力は出力容量の4%程度なので、直流側のパワエレ制御装置は小型で済むというメリットもあります。

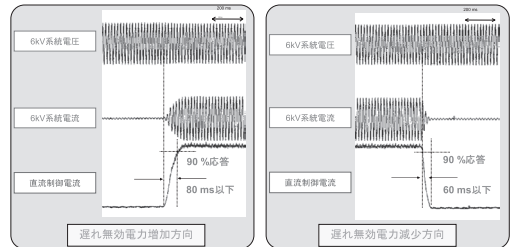
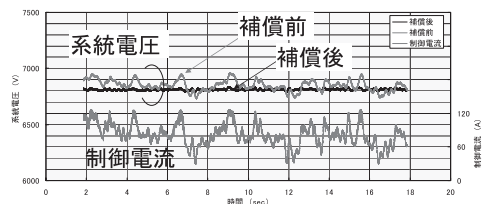


図17 制御応答特性

図18は6,600V の実配電系統に接続して試験を行った結果です。補償をかけないときの系統の電圧は6,600V に対して400V 程度変動しますが、補償後はほぼ6,600V 一定に調整されています。現在何か所かで実証試験を進めていていずれも問題なく動いています。



300kVAの
装置外観

図18 6600V-300kVA 実証機とフィールド試験結果

3. SRモータと電気自動車

図19はSR モータの外観と駆動回路です。SR はスイッチトリラクタンスの略ですが、写真のように、固定子鉄心も回転子鉄心も突極構造で、巻線は固定子に巻かれます。巻線に電流を流すとその極が電磁石になって最も近い回転子極を引き付けます。したがって、回転子の位置角を検出して

駆動回路のトランジスタのオンオフを切りかえれば、回転磁界が生じ回転子は連続回転します。このように動作原理は非常に単純です。このモータは磁石を使っていないことと、直流モータのようなブラシも整流子もありません。磁石レスかつブラシレスが最大の特徴になります。

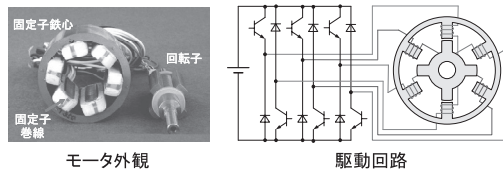


図19 スイッチリラクタンス (SR) モータ

SR モータの特徴をさらに詳しく見ていくと図20のようにまとめられます。まず非常に頑丈で安価です。また、回転子が鉄心だけです。高速回転に適します。これらの特徴に着目すると電動工具への応用が考えられます。当研究室で開発したSR モータで、現状の電動ドリルに使われているPM モータに匹敵する性能が得られることを確認しています。さらに、磁石を使っていないため高温環境に強いという特徴があります。例えばハイブリッド電気自動車のようにエンジンルームにモータが設置される方式では、SR のように高温に強いモータが求められます。また、PM モータで問題になるコギングトルクがないというメリットもあります。それから磁石モータでは回転子が回るだけで誘導起電力が生じますので取り扱いに注意が必要です。SR モータではこれらの問題がないので電気自動車用に適すると言えます。中でもホイールの中にモータを組み込むインホイール方式の電気自動車への応用が期待されます。

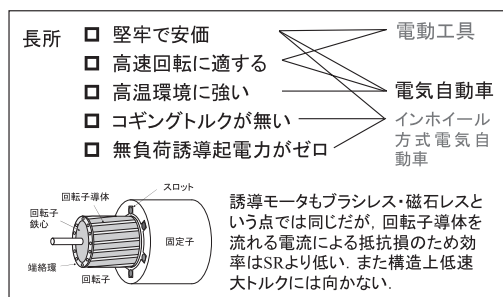


図20 SR モータの特徴

しかし、SR モータは固定子鉄心、回転子鉄心ともに突極構造のため、トルクリプルが大きいこ

と、モータ自体の振動と騒音が大きいという問題が指摘されます。さらに、希土類磁石を使ったPM モータと比較すると出力と効率が劣るという問題もあります。私どもは電気自動車への応用を進めながらこれらの問題の改善を図ってきました。例えばトルクリプルと騒音に関しては、モータ駆動回路の制御を工夫すればある程度改善できることを提案しています(図21)。図22は、私どもで開発したアウターロータ型SR モータによるインホイール方式の電気自動車です。平地ですが時速30～40kmで走行可能です。

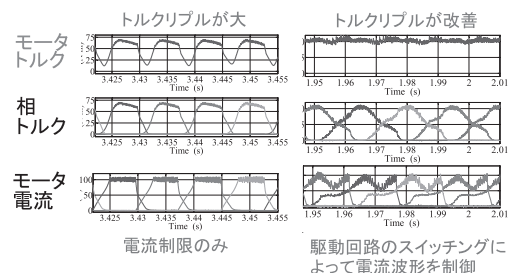


図21 巻線電流の瞬時制御によるトルクリプル改善

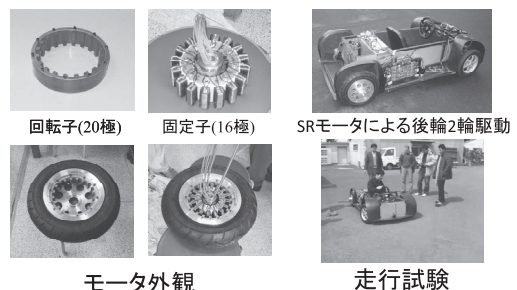


図22 アウターロータ型SR モータによる電気自動車

しかし、実用化のためにはSR モータのトルクと出力のアップが必要です。通常のモータは、図23の左側の図のように、磁束の流れる向きが半径方向でラジアルギャップ型と呼ばれます。これを右の図のような構造にすると磁束の向きが軸方向になります。巻線に流す電流をトランジスタのスイッチで切りかえれば、円周方向に回転磁界が発生しますので、円盤状の突極形回転子を配置すればSR モータとして回ります。このような構造のモータをアキシアルギャップ型と呼んでいます。

アキシアルギャップ型のメリットは、薄くしてもトルクが下がらないということです。ラジアルギャップでは、モータを薄くすると鉄心断面積が減少しますので利用できる磁束も減りトルクも減

少しします。アキシシャルギャップ型では薄くしても磁束の通る鉄心断面積は変わりませんのでトルクも維持されます。そのため薄型モータに適した構造とされています。さらに、マルチギャップ化といって、固定子や回転子を2段か3段に重ねてトルクをアップさせることが容易というメリットもあります。

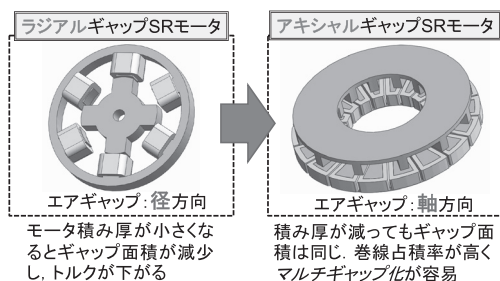


図23 アキシシャルギャップ型 SR モータの基本構造

どの程度の性能が出るか計算で確認したのが図24です。ラジアルギャップ型 SR モータを単純にアキシシャル構造にしたのがシングルロータタイプですが、トルク対電流特性の改善が確認されます。ダブルロータタイプはシングルロータのアキシシャルギャップモータを背中合わせにした構造になります。図をみるとダブルロータタイプのトルクが大幅に改善されていることがわかります。詳しい説明は省略しますが、SR モータでは固定子極と回転子極の対向時と非対向時の巻線インダクタンスの比（突極比と呼ぶ）でトルクが決まります。磁気特性が線形であればシングルロータもダブルロータも突極比は変わりませんが、磁気飽和がありますのでダブルロータのほうが突極比が上がり、結果的にトルクが増大することを解析ならびに実験で明らかにしました。

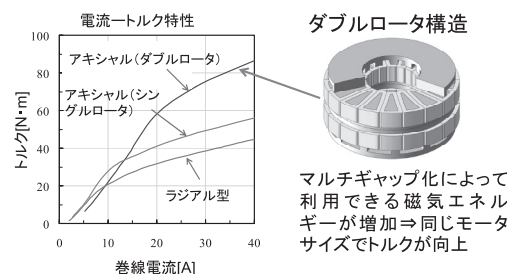


図24 モータ特性の比較（計算値）

図25はダブルロータ型アキシシャルギャップ SR モータの試作機と動作特性です。上の写真が固定子と回転子で、固定子の上と下から挟むようなダブルロータ構造としてホイールの中に納めたものが右の写真です。出力特性の実測結果が下のグラフで、横軸が巻線電流密度、縦軸が単位体積当たりのトルク密度を表しています。アキシシャルギャップ SR モータのトルク特性の実測値がプロットで実線が計算値です。破線は同じ体格を持つラジアルギャップ SR モータにおける計算値です。これを見ると計算値と実測値は傾向が一致し、ラジアルギャップ型よりアキシシャルギャップ型のほうが高トルクであることがわかります。さらに、巻線電流密度 20 A/mm^2 付近のトルク密度は $39\text{ N}\cdot\text{m/L}$ で、現行のハイブリッド車に使われている希土類磁石モータのトルク密度（ $35 \sim 49\text{ N}\cdot\text{m/L}$ ）と同等であることもわかります。

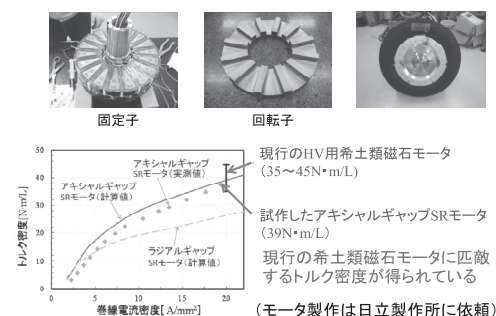


図25 ダブルロータ型アキシシャルギャップ SR モータの試作機と特性



図26 アキシシャル SR モータを適用したインホイール方式の小型電気バス

アキシシャルギャップ型 SR モータを2台製作してインホイール方式の小型バスを開発しました（図26）。後輪にアキシシャルギャップ型 SR モータを組み込んで走行試験を行いました。切り抜きは日刊工業新聞に掲載された記事です。この研究は、

2011年から12年にかけて問題になったレアアースショックと時期が重なり、新聞やインターネットで多数取り上げられました。

4. 磁気回路法とモータ解析

これは磁気回路を使ってモータのダイナミックな動作解析を行うという研究です。背景として、企業などのモータ設計では開発期間の短縮と開発コストの削減が大きな課題になっていて、より高速で高精度な設計ツールが要求されているということがあります。

従来のモータ解析手法を考えてみますと、オーソドックスな方法はモータの電気等価回路です。これはモータを抵抗、インダクタンス、および起電力でモデル化する方法です。電気等価回路は計算時間が短く、インバータなどのドライブ回路も含めた解析には適しますが、等価回路定数を実験などで求める必要があり、鉄心の非線形磁気特性やモータ内部の磁束分布まではわかりません。

有限要素法による磁場解析は、非線形磁気特性や磁束分布を考慮した解析が可能です。しかしモデルによっては計算時間が長大になり、駆動回路であるインバータと組み合わせた解析は難しいのが現状です。さらに、回転数が増えるようなダイナミックな特性の計算は時間がかかりすぎて実用的でないという面もあります。

Matlab/SIMULINK という制御系でよく使われるツールもあります。これはモータを伝達関数で表すもので、モータのダイナミックな制御特性の計算に向いています。ルックアップテーブルを利用すれば非線形磁気特性も考慮できますが、計算時間がかかるとか、ルックアップテーブルを作成するにはモータの特性を予め磁場解析で求めなければならないなどの難点があります。

磁気回路法は、磁束の流れを集中定数回路で扱うことによって磁気現象を巨視的に解析する方法です。図27のように、トロイダルコアの巻線に電流を流したときに、鉄心内を流れる磁束は鉄心の磁気抵抗と起磁力から計算されます。右の回路はこの関係を電気回路的に表したもので、 Ni が起磁力、 R が磁気抵抗、 ϕ が磁束です。磁気抵抗は鉄心の透磁率 μ と断面積 S 、および磁路長 l で計算されます。巻き数と電流が指定されれば、磁束は電気回路のオームの法則と同じ計算で求められます。古くからある手法ですが設計の現場では現在もよく使われています。

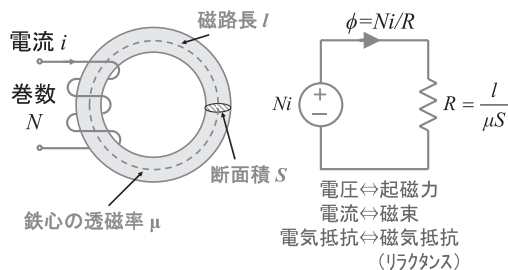


図27 磁気回路法の簡単な説明

しかし、磁気回路法は、複雑な形状の磁心への適用は難しい、磁気特性の非線形性は扱えない、鉄心の損失は考慮できない、モータのように動いている状態での解析は無理と言われてきました。これに対して私は、複雑な磁心形状の場合は解析対象を分割してそれぞれの要素を磁気抵抗で表現すること、非線形磁気特性は非線形磁気抵抗でモデル化することを提案しました。また、回転時は固定子からみた回転子の磁気回路が変化することに着目し、回転子位置角によって変化する磁気抵抗や起磁力を用いた回転子モデルを考案しました。さらに運動方程式も電気回路で表現できることから、モータの磁気回路、駆動部分の電気回路、運動方程式回路を結合して、電気・磁気・運動という3つの系を同時に解析することを提唱しました。解析規模は大きくなりますが、汎用の回路シミュレータを利用すれば比較的容易に計算できます。

当研究室では、モータ以前に磁気回路法を直交磁心の解析に適用しています。すなわち、図式解析だけではいろいろな応用回路に対応できなくなってきましたので、1980年代は直交磁心の磁化曲線から非線形な回路方程式を導出して、当時普及が進んでいたパーソナルコンピュータを使って数値計算していました。しかし直交磁心の磁化曲線を実験で求めていたため、最適設計は難しいという状況でした。そこで直交磁心の磁化曲線を計算で求めようということで始めたのが磁気回路網による解析です。これは図28のように、直交磁心をいくつかの要素に分割し、それぞれの要素を3次元的な磁気抵抗回路でモデル化して、得られた非線形磁気回路網を回路シミュレータで計算するという方法です。これによって懸案だった直交磁心の磁化曲線が計算できるようになりました。

1990年代は有限要素法もかなり使えるようになっていましたが、直交磁心のように磁束分布が3次元的で磁気特性の異方性や非線形性が強い間

題は有限要素法でも解けませんでした。磁気回路法を使ってこのような厄介な問題をクリアできたことが後のモータ解析に生きたと考えています。

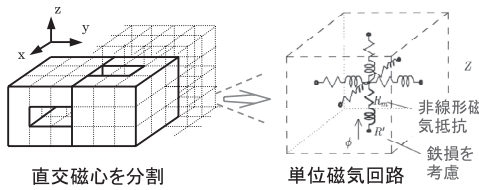


図28 磁気回路網による直交磁心磁化曲線の計算

非線形磁気特性は、図29のように、磁界強度を磁束密度の多項式で表すことができます。これは磁気抵抗が磁束レベルで変わることを行していますが、SPICEをはじめとする回路シミュレータでは従属電源と呼ばれる組み込み素子があり、これを利用すれば非線形素子のモデル化も可能になります。

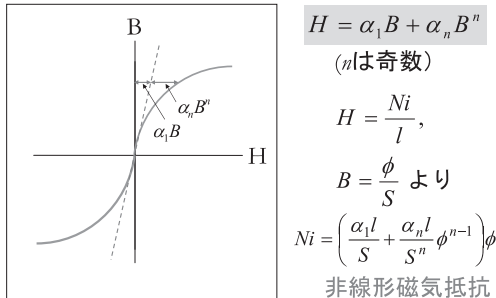


図29 非線形磁気特性の表現方法

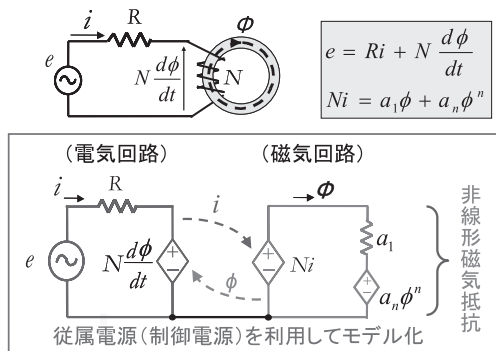
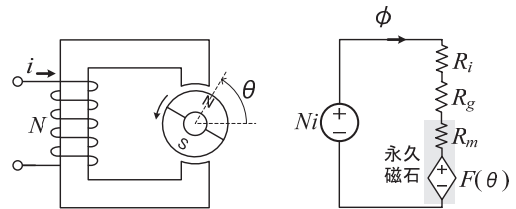


図30 電気回路と磁界回路の結合モデル

このような考えに基づいて非線形磁心をモデル化すると図30のようになります。非線形磁気抵抗

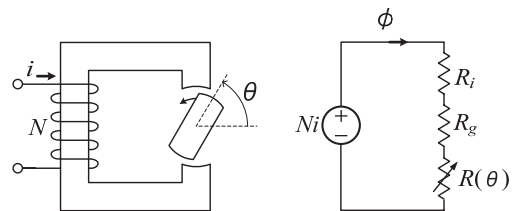
は、線形抵抗と非線形従属電源の直列回路でモデル化されます。 Ni も従属電源で、電気回路の電流と巻数の積で与えられる起磁力源に対応します。電気回路は電源と抵抗、および巻線の誘起起電力を与える従属電源で構成されます。この従属電源の特性は磁気回路で計算される磁束の微分で与えますので、電気回路と磁気回路が結合された電気—磁気連成解析が可能になります。

前述のように、回転子は回転子位置角で変化する磁気抵抗や起磁力源で表現できます。図31に永久磁石回転子の磁気回路モデルを示します。永久磁石は磁気回路的には起磁力源と内部抵抗で表されますので、起磁力が回転子の位置角で変化する可変起磁力源を使えば永久磁石回転子のモデルが得られます。リラクタンスモータのような突極型回転子は、固定子から見ますと回転に応じて磁気抵抗が変化しますので、図32のように、回転子位置角で変わる可変磁気抵抗でモデル化できます。



$F(\theta)$: 回転子位置角で変化する起磁力源

図31 永久磁石回転子の磁気回路の基本的考え方



$R(\theta)$: 回転子位置角で変化する可変磁気抵抗

図32 突極型回転子の磁気回路の基本的考え方

モータのトルクは、図33に示したように、2通りの方法で計算できます。1つは磁気回路のエネルギーを回転子位置角で微分する方法です。単純な磁気回路の場合はこの方法が便利です。しかし領域を細かく分割した場合、各領域のエネルギーを計算すると膨大な作業になります。このような場合は、磁束密度と磁界勾配の積の体積分に基

づいて計算します。磁気回路法ではこの式を離散化し、分割したそれぞれの領域の起磁力の差分と磁束からトルクを求めます。

磁気回路のエネルギーから求める場合

$$\tau_m = - \left[\frac{\partial W(\phi, \theta)}{\partial \theta} \right]_{\phi=\text{一定}} = \left[\frac{\partial W'(i, \theta)}{\partial \theta} \right]_{i=\text{一定}}$$

磁気回路の磁束と起磁力から求める場合

$$\tau_m = \int_V \mathbf{B} \cdot \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \theta} dV \text{ を離散化して適用}$$

(RNAの場合にこの方法で計算)

図33 モータトルクの計算方法

以上より、モータのダイナミックシミュレーションの流れをまとめますと図34のようになります。モータの磁気回路モデルとインバータ等の駆動回路を結合し、計算されるトルクを運動方程式に代入すればモータの回転数が算出されます。回転数を積分するとモータの位置角になりますので、それをもとに駆動回路のゲート信号を生成します。これによって、モータのドライブシステム全体のシミュレーションが可能になります。

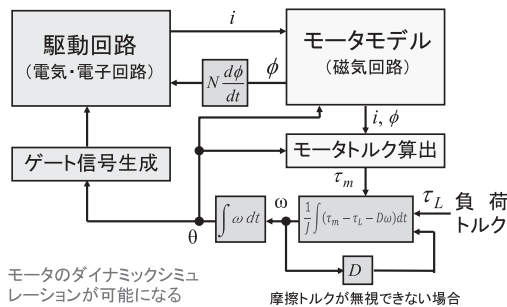


図34 モータのダイナミックシミュレーションの流れ

SR モータの場合、回転子が突極構造なので可変磁気抵抗でモデル化します。図35はSR モータの磁化曲線の例で、固定子巻線から見た磁化曲線が回転子位置角で変化する様子を表しています。これは直交磁心の磁化曲線と基本的には同じなので、直交磁心の解析で培った手法をそのまま使うことができました。

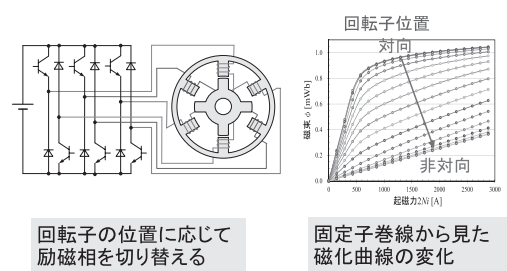


図35 SR モータの駆動回路と固定子から見た磁化曲線の変化

以上の考えに基づくSR モータの磁気回路モデルを図36に、シミュレーション結果を図37に示します。モータの電圧と電流波形の計算値と実測値を見ますと、波形の特徴が細部まで良く再現されていることがわかります。トルク速度特性では実線が計算値、プロットが実測値でパラメータは直流電源の電圧です。これも良好に一致しているということが了解されます。

磁気回路法ではモータを分割しますので、モータ内の磁束密度分布がある程度わかるという特徴があります。図37の左下の図は磁気回路法で得られた磁束密度分布と有限要素法で計算した結果を比較したもので、ほぼ一致することが確認できます。磁束密度分布がわかるということは鉄損が計算できるということになり、最適設計が可能になります。

右下の図はSR モータの始動時の電圧、電流、トルクおよび回転数を計算したものです。モータの電気磁気特性から機械特性、さらに始動特性まで1つのモデルで計算できることが磁気回路法の大きな特長と言えます。

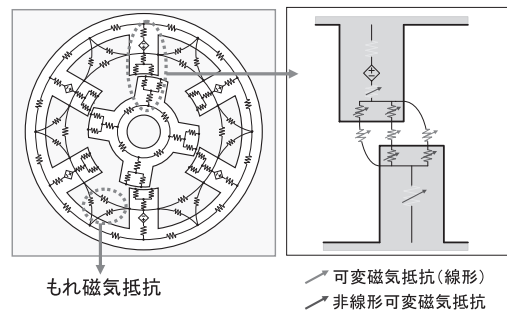


図36 SR モータの磁気回路モデル

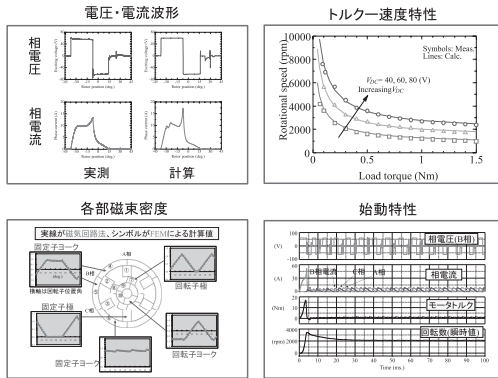


図37 シミュレーション結果

最後にこれまでの磁気回路法の解析事例をいくつか紹介します。図38は表面磁石型モータの計算例です。これも波形レベルで非常によく一致していると言えます。図39は、3次元的な形状を持ったクローティースモータを磁気回路法で解析した例です。3次元構造のモータを有限要素法で解析すると計算だけで数日かかることもありますが、磁気回路法を使うと数時間ぐらいで計算できます。

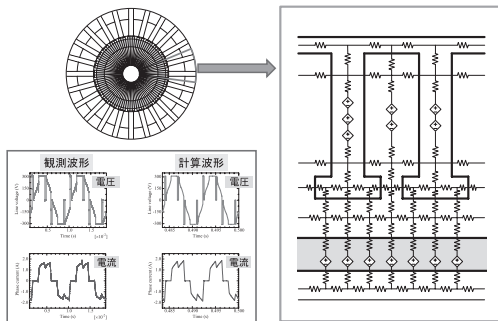


図38 表面磁石形モータの解析

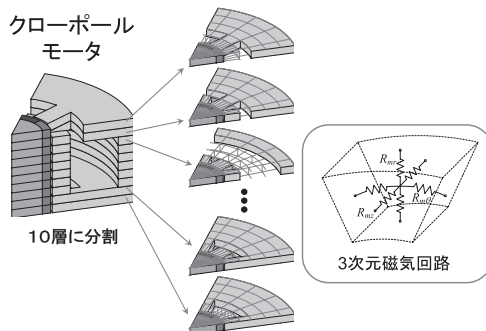


図39 3次元モータ(クローティースモータ)の解析

磁気回路法を拡張すれば、磁束の計算だけではなく磁石のうず电流も解析できます。回転子磁石のうず电流解析は、有限要素法では計算時間のかかる問題として知られていますが、図40のように、磁束分布を計算する磁気回路網とうず电流を計算する電気回路網に分けてモデルを構築し、これらを連携させることによって比較的短時間で計算する手法を提案しました。

磁気回路法の特徴をまとめますと、簡便なモデルで精度が良い解が得られること、電気回路や電子回路、さらに熱等価回路との連成解析が可能なこと、計算時間が短いこと(有限要素法の1/50～1/100程度)、非線形磁気特性や鉄損を考慮しやすいこと、モータ内部の物理的なイメージが把握しやすいことなどが挙げられます。もちろんこれで完成された解析法というわけではなく、今後も修正や改良を加えて、より強力な解析ツールにしていきたいと思っています。

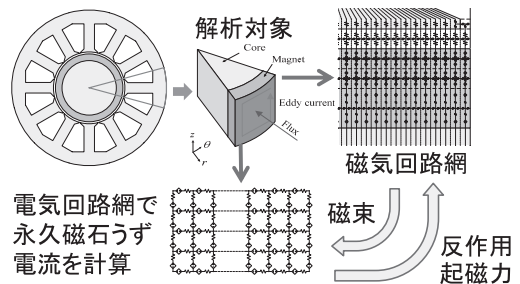


図40 電気磁気回路網による磁石うず电流の計算

本日は電力磁気応用について話をさせていただきました。磁気の特質はエネルギー変換効率が非常に高いことと大電力の電氣的な絶縁が容易ということです。これはシステムの機能と信頼性を高めるうえで非常に大切な性質です。また、最近ワイヤレス給電が活発化していますが、非接触にエネルギーが伝送できることも磁気の大きな特徴です。最近新しい磁性材料が開発され、鉄心の加工技術も進んでいます。電力磁気応用の分野でも新たな展開が期待されます。

最後に研究を支えて発展させてくれたスタッフとアクティブに研究に取り組んだ学生諸君に感謝します。また、企業との共同研究では特に物づくりという面で非常にお世話になりました。心より感謝申し上げます。私の最終講義を終わらせていただきます。